

ZVÝŠENÍ PRODUKTIVITY TVORBY ANORGANICKÝCH NANOVLÁKEN

Ing. Radovan Kovář

Sekce - STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 2. ročník
Doktorský studijní program – KONSTRUKCE STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Abstrakt: V současné době je již znám a hojně využíván proces výroby nanovláken. Použitelnost nanovláken je pozorovatelná v mnoha odvětvích a setkáváme se s nimi prakticky každý den. Stále přibývají možnosti jejich uplatnění. Zájem o jejich využití roste, proto je snaha o jejich výrobu v co možná největším měřítku, při minimálních nákladech. Zvyšováním produktivity výroby nanovláken se snižují nároky na spotřebu energií a přírodní zdroje. Optimalizací konstrukce stroje nebo jeho částí pro tvorbu nanovláken při procesu elektrostatického zvlákňování lze zvýšit produktivitu jejich výroby.

Klíčové slová: Nanovláknó, elektrospinning, kartáč, účinnost

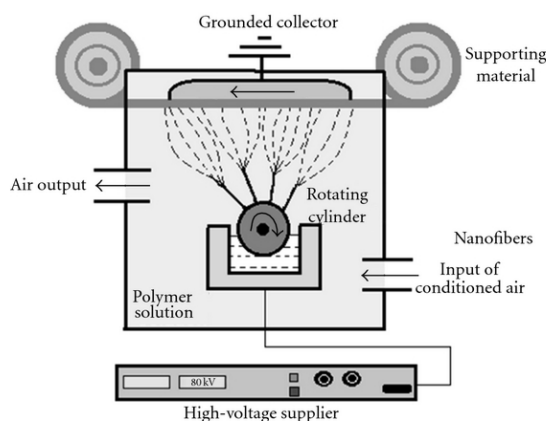
1 Úvod

Nanovláknó je textilní výrobek, jehož průměr se pohybuje v měřítku menším než 1 mikrometr. Pro porovnání je často uváděn rozměr lidského vlasu, kdy nanovláknó je tisíckrát menší. Možnosti uplatnění nanovláken jsou v dnešní době široké. Bývají označovány jako materiál třetího tisíciletí. Prosadit se mají v oblastech medicíny, filtrace, automobilového průmyslu, nanokompozitů, ochranných pomůcek a dalších. První produkt na trhu vyrobeným z nanovláken byl pozorován v 80. letech minulého století. Stále však v problematice výroby nanovláken je mnoho neznámých. První pokusy o elektrostatické zvlákňování se datují na počátek 20. století. V průběhu času bylo vyzkoumáno několik principů výroby nanovláken. Uvedme zde především předemní průtahem, zvlákňování fázovým dělením, samosběrem, ale především elektrostatickým zvlákňováním. Právě poslední zmiňovaný princip vyčnívá nad ostatní svou produktivitou. Proto se v současné době stal nejrozšířenějším způsobem výroby. Do provozu se dostal ve spojitosti ze zařízením, ve kterém je prováděn. Tento přístroj je nazýván Nanospider. Funkčnost procesu elektrostatického zvlákňování je však závislá na mnoha parametrech. Je zde vliv použitého polymeru, hodnota přivedeno napětí do prostoru zvlákňování, materiál zvlákňování elektrody, materiál a konstrukce kolektoru, vzdálenost kolektoru od zvlákňování elektrody, teplota a vlhkost prostředí, proudění vzduchu, velikost boxu kde zvlákňování probíhá, překážky v prostoru boxu [1-6].

2 Proces elektrostatické zvlákňování

Nejrozšířenějším způsobem jak vyrábět nanovlákná v průmyslovém měřítku je princip zvlákňování z "válečku". Zařízení, které tento způsob výroby nanovláken umožňuje se nazývá Nanospider. Jedná se laboratorní zařízení vyrobené z izolačních materiálů. Uvnitř zařízení se nachází prázdný prostor, ve kterém probíhá proces zvlákňování. Velikost tohoto prostoru je různý. Nejmenší jsou určeny pouze pro jednu vanu s kolektorem. Do velkých se bez problémů vejdu i čtyři lidé. Nevodivá konstrukce je osazena dvěma vysokonapěťovými zdroji, které dodávají napětí o velikosti až 100 kilovoltů do prostoru zvlákňování. Komora je napojena na

klimatizaci. Proudění vzduchu skrze komoru, stejně jako teplota a vlhkost, hraje nemalou roli v úspěšnosti spuštění procesu. Uprostřed komory je umístěna vana do které se nalije roztok polymeru. Lze zvláknovat jak organické, tak anorganické plastové roztoky. Ve vaně se otáčí zvláknovací elektroda, která je ani ne z poloviny ponořena do polymeru. Na ni je přiveden zdroj napětí. Nad elektrodou je kolektor, který je uzemněný a přes který je přetahován spunbond. Ten slouží jako podporující materiál, protože pomocí nich jsou vlákna odvedena z prostoru komory. Pro ochranu vláken je na ně ihned po jejich opuštění labu přiložen další podporující materiál a vzniká tím tzv. sandwich. Rotace elektrody je zajištěna pomocí elektromotoru, který je však připevněn ke konstrukci mimo pracovní prostor stroje. Kroučící moment je přiveden na elektrodu přes hřídel motoru a kuželové soukolí. Schéma principu funkce Nanospideru je znázorněno na obr. 1. [7]

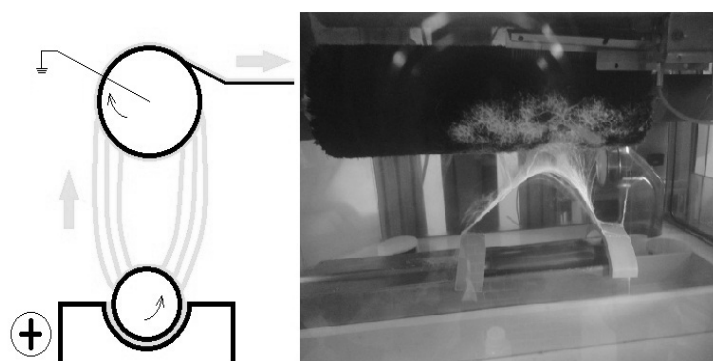


Obrázek 1: Schéma funkce laboratorního zařízení Nanospider

2.1 Optimalizace komponentů zajišťující proces

Nevýhodou předchozího řešení je výroba vláken, která jsou nesena dalším elementem, v tomto případě pomocí spunbundu. Myšlenka v zavedení nepřetržitého provozu spočívá v získání samostatných vláken pro možnost dalších úprav. Z principu je vhodné zachovat počáteční kombinaci elektrody a vany s polymerem. Toto nanášení je zaběhnuté a jeho fungování je ověřené. Pro optimalizaci tedy zůstává úprava kolektoru. Je potřeba aby kolektor byl uzemněn. Dále je třeba aby plocha pro zvláknění byla neustále čistá, jinak nedojde k vytvoření vláken. Z dřívějších pokusů vyplývá, že se zvyšující hustotou položených vláken na kolektoru se snižuje jejich vytváření na zvláknovací elektrodě. Pro nepřetržitý proces je stěžejní podmínkou zachování minimální účinnosti zvláknování během jeho trvání. Dá se tedy říci, že musí být v jeden okamžik materiál zvlákněn a zároveň musí být zvlákněný materiál stržen. Dle metodiky TRIZ, která pomáhá řešit technické problémy, je možné řešení v rozdělení problému v čase nebo v prostoru. Této podmínce vyhovuje nahrazení pevného kolektoru rotačním prvkem. Rotační prvek má osu rovnoběžnou s osou rotace elektrody. Jeho otáčky jsou nižší, než otáčky elektrody. Během jedné otáčky je jedna jeho polovina povlákňena zatím co na jeho druhé straně dochází ke strhávání vláken z jeho povrchu. Při začátku druhé otáčky se již do prostoru zvláknování dostává opět čistý materiál. Problematikou však zůstává, jaký rotační prvek zvolit. Jeho povrch musí splňovat podmínku potřebnou pro proces zvláknování a zároveň musí existovat způsob, jak vlákna z takového povrchu sejmout. Pro snímání je nevhodnější hladký čistý povrch. Takový tvar je však nedostatečný pro vytvoření ideálního procesu zvláknování. Vzhledem k tomu, že prioritní podmínkou je spuštění procesu elektrovláknování, byl nahrazen hladký povrch povrchem tvarovým. Můžeme říci, že čím více uzemněných bodů, tím více vlá-

ken se po dobu procesu vytvoří. Takové podmínky splňuje válcový rotační kartáč. Jedná se o rotační prvek, který má po rozdělení střední rovinou dvě identické části. Zároveň je zde mnoho samostatných bodů, které tvoří dráty kartáče. Počet bodů je získán průměrem drátů a jejich hustotou osazení. Všechny dráty musí být uzemněny, aby mohly fungovat jako kolektor. Kartáč se otáčí rychlostí od 1 otáčky za 5 minut, až po rychlost 1 otáčky za 10 minut. Pro zachování kontinuálního procesu je třeba nahromaděná vlákna z povrchu kartáče odstranit. Proto je nutné do systému následně integrovat strhávací zařízení s mechanickými nebo vzduchovými prvky na opačnou stranu kartáče, než kde probíhá povlákňování. Vzhledem k vysokému napětí uvnitř komory stroje, nesmějí být použity v zařízení jakékoliv elektronické prvky. Strhaná vlákna jsou potom odváděna mimo prostor stroje. Princip procesu zvlákňování na rotační válcový kartáč je znázorněn na obr. 2.



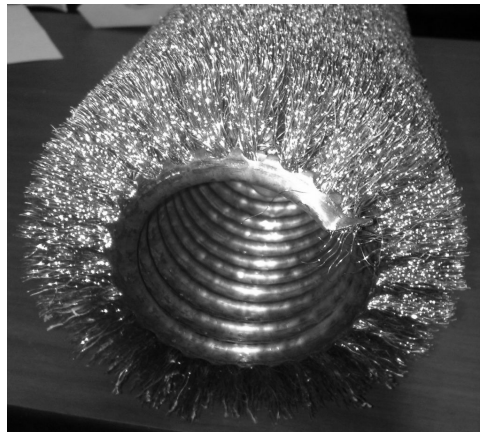
Obrázek 2: Princip nepřetržitého procesu elektrovlákňování

3 Komponenty optimalizovaného procesu

Nastává otázka, jaké parametry kartáče jsou nejvhodnější pro co možná nejvyšší účinnost zvlákňování. Volbou rotačního kartáče, co by elektrody, vzniká technický problém ve strhávání naneseného materiálu z jeho povrchu. Parametry jako hustota, délka a materiál drátů určují jak efektivitu zvlákňování, tak složitost strhávání vláken z kartáče. Výhodou je, že není podstatná forma vláken, v jaké budou strhány.

3.1 Kartáč

Protože rotační válcový kartáč nahrazuje jednu z elektrod, musí být jeho celý povrch vodivý v co možná maximální míře. Proto při výběru materiálů, ze kterých budou vyrobeny dráty kartáčů, byl kladen důraz na vysoké hodnoty vodivosti. Prvním způsobem je spirálový válcový kartáč, kdy dráty jsou upevněny do plechu. Ten je následně stočen do spirály, čímž drží požadované rozměry. Vodivost drátů je zajištěna pomocí plechu, na který je přiveden náboj. Takový kartáč je vidět na obr. 3. Druhým způsobem výroby válcového rotačního kartáče je vsazování trsů drátů do plastového jádra. V plastovém válcovém jádru požadovaného rozměru jsou předvrtány díry v pravidelných rozestupech, do kterých jsou usazeny trsy drátů. Náboj je na jednotlivé trsy přiváděn přes vodivý drát, který je propleten mezi nimi. Rozměry kartáčů jsou závislé na okolních parametrech v průběhu procesu. Délka kartáče musí být větší než délka zvlákňovací elektrody. V našem případě byla zvolena délka kartáčů 340 mm při délce zvlákňovací elektrody 250 mm. Průměr kartáčů byl sjednocen na 120 mm. Zde byly limitním faktorem zástavbové rozměry komory, protože vzdálenost povrchů elektrody a kolektoru musí být 180 mm pro spuštění optimálního průběhu procesu pro testovaný polymer. Variabilita mezi jednotlivými kartáči byla zajištěna v poměru průměrů jejich jader a délkou použitých drátů.



Obrázek 3: Princip nepřetržitého procesu elektrovlákňování

3.2 Strhávací mechanismus

Pokud použijeme kartáč s vhodně vybranými parametry dojde ke kompletnímu pokrytí jeho povrchu silnější vrstvou vláken. Pro nepřetržitý proces je třeba tuto vrstvu strhnout tak, aby na kartáči nezůstala žádná vlákna. Strhávání je možné zajistit kontaktně nebo bezkontaktně. kontaktní strhávání spočívá v použití externího nástroje, který přeruší vazby mezi vlákny a konci drátů kartáče. Bezkontaktní strhávání si můžeme představit jako odsávání proudem vzduchu. Při návrhu mechanismů je třeba mít na paměti vlastnosti nanesené vrstvy anorganických vláken. Při jakémkoli kontaktu se vlákna lepí. Je zřejmé, že hlavní problém spočívá v elasticitě vlasců kartáče a v tloušťce hřebenu. Proto byl použit kartáč s ocelovými dráty a kovový hřeben. Ocelové dráty mají při délce 20 mm a průměru 0,2 mm menší elasticitu než plastové vlasce a neohýbají se tak o hřeben. Ten zajíždí tečně na povrch kartáče do hloubky 2 mm a koná přímočarý vratný pohyb kolmo na osu kartáče. Celý systém byl doplněn o odsávání, které má zajistit odtažení vláken zachycených na hřebenu. Strhávací systém se spustí po vytvoření souvislé vrstvy vláken. Kompletní systém bez zapnutého odtahu je znázorněn na obr. 4. Tato varianta řešení vykazovala téměř dokonalou schopnost vyčistit povrch kartáče od nanovláken a zároveň je odvést z pracovního prostoru. Jedná se o kombinaci kontaktního a bezkontaktního strhávání. [8]

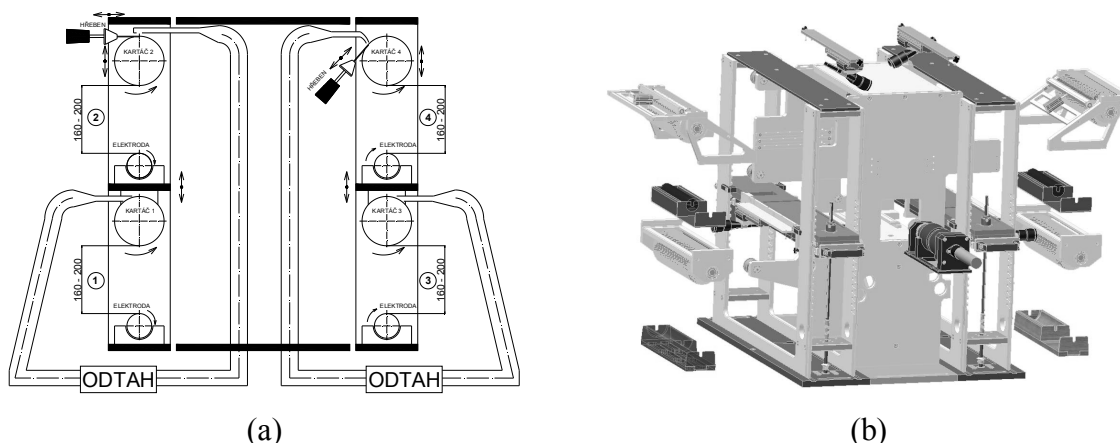


Obrázek 4: Princip nepřetržitého procesu elektrovlákňování

4 Konstrukce testovacího stroje

Po vyselektování kartáčů, vhodných pro aplikaci na elektrostatické zvlákňování, byl navržen stroj, pro odzkoušení procesu v reálném měřítku. Schéma stroje je znázorněno na obr. 12.

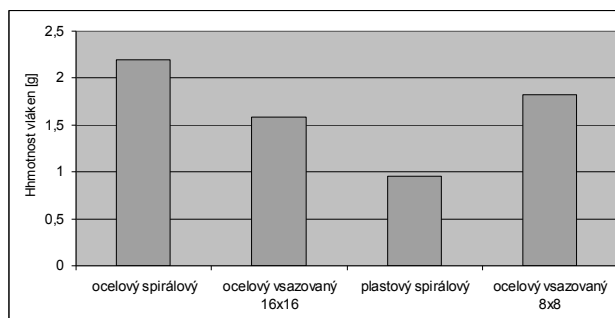
Na stroji jsou použity 4 zvláknovací elektrody a 4 kartáče jako kolektory. Elektrody jsou ve všech případech stejné. Rozdílné jsou však vany, ve kterých jsou elektrody usazeny a zároveň je v nich nalit polymerový roztok připravený ke zvláknování. Každá vana je z jiného materiálu a je vyrobena jinou technologií. Jako materiály van jsou použity: sklo, dřevo, plech s modifikací jeho vlastností plasmou, plast. Na každý kartáč byl aplikován jeden ze strhávacích systémů pro odvod vláken. Konstrukce stroje byla navržena s ohledem na funkčnost, jednoduchost a variabilitu. Důraz byl kladen na jednoduchost výměny kartáčů a vaniček mezi sebou. Na obr. 5 je vidět modulární návrh konstrukce. Jako modul lze uvést: pohon kartáčů, jednotlivé vany, jednotlivé kartáče s uložením, odsávání. Hlavním prvkem bylo zajištění pohonů kartáčů řemenovým převodem. Všechny 4 kartáče museli být napojeny na jeden pohon. Veškeré pohonné prvky nesmí být elektricky řízené, proto pro pohon kartáčů, stírání a odsávání byl aplikován pneumatický pohon. Na každou elektrodu umístěnou ve vaně musel být přiveden kroučící moment. Ten byl jako jediný realizován elektromotorem, který byl umístěn mimo zvláknovací komoru a byl od ní odstíněn. Stroj byl rozdělen do 4 částí. Každá část byla tvořena vanou s polymerem, zvláknovací elektrodou a kartáčem se strháváním a odtahem. Proces zvláknování je závislý na mnoha faktorech. Jedním z nich je vzdálenost mezi elektrodou a kartáčem. Ideální hodnota pro zvláknovaný anorganický roztok je 180 mm. Pro možnost testování bylo zvoleno rozmezí mezi 160 mm a 200 mm s krokem 20 mm. Bylo tedy možné testovat ve všech čtyřech částech na maximální i minimální vzdálenosti.



Obrázek 5: (a) Schéma experimentálního zařízení, (b) Modularita zařízení.

5 Experiment

Pro nepřetržitý provoz byly odzkoušeny všechny varianty kombinací jednotlivých prvků. Tedy každý z popisovaných kartáčů byl vyzkoušen se všemi variantami strhovacího systému. Podmínky testu byly pro všechny pokusy stejné. Zvláštní pozor byl dán na klimatické podmínky ve zkušebním prostoru, na vzdálenost mezi elektrodou a kolektorem, na rychlost otáčení elektrody a kolektoru. Pro testy byl použit anorganický polymer, konkrétně oxid titanu. Hodnoty napětí se pohybovaly v rozmezí 70 000 voltů až 80 000 voltů. Pro nepřetržitý provoz je nejvhodnější použít spirálový kartáč s ocelovým drátem o průměru 0,15 až 0,25 mm. Během experimentu vykazoval nejvyšší účinnost. Porovnání účinností všech kartáčů na jednu otáčku je znázorněno v graf. 1. Takto dimenzovaný kartáč byl ve všech testech potažen souvislou vrstvou vláken bez viditelných defektů.



Graf 1: Porovnání účinností kartáčů

6 Závěr

Princip elektrostatického zvlákňování je nejrozšířenějším způsobem výroby nanovláken. Tento způsob se vyznačuje dobrou účinností ve srovnání s ostatními způsoby. Proto je vhodné se na tento princip zaměřit a pokusit se o jeho optimalizaci. Nepřetržitý provoz je možný s využitím válečku jako zvlákňovací elektrody a rotačního kartáče jako kolektoru. Kartáč má schopnost nabídnout ve stejný okamžik jednu svou polovinu plochy pro zvlákňování a druhou polovinu pro strhávání. Ve správné kombinaci rychlosti otáčení elektrody, rychlosti otáčení kartáče, bezporuchovosti strhovacího zařízení a síly odsávání je možné zajistit dostatečné očištění kartáče. Tím se jeho povrch stále nezanášá přebytečnými vlákny a je možné tak hovořit o nepřetržitém provozu výroby nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování. Pro nepřetržitou výrobu je vhodné použít spirálový ocelový kartáč v kombinaci s jednoosým strhovacím mechanismem. Tato varianta je zvolena na základě experimentu.

Literatura

- [1] ANGAMMANA, C. J. – JAYARAM S. H. (2011): “*Effects of Electric Field on the Multi-jet Electrospinning Process and Fiber Morphology*”. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47 (2), pp. 1028 – 1035.
- [2] Wang, X. et al. (2007): “*Investigation of Dielectric Strength of Electrospun Nanofiber Based Thermal Interface Material*”, In: Proceedings of High Density packaging and Microsystem Integration, HDP '07, pp.1-6.
- [3] PETRŮ, M. – NOVÁK, O. – LEPŠÍK, P. (2012): “*Increase of the efficiency of the production lines for the spinning of inorganic nanofibers by the electrostatic field intensity optimization*”, MM Science Journal, No. 4, pp. 382-385.
- [4] VEJRYCH, D. – ŠEVČÍK, L. (2012): “*Assessing the distribution of deformation in layers in 3D nanostructures spinning into another space*”, In: Proceedings of 5th International Mechanical Engineering Forum, Prague, pp. 962-970
- [5] PETRŮ, M. – NOVÁK, O. (2010): “*Mechanical properties measurement and comparison of polyurethane foam substitute*”. ACC Journal, Vol.16, Issue A, Natural Sciences and Technology, pp. 50-59.
- [6] LUKÁŠ, D. - SAKAR, A. - MARTINOVÁ, L. - VODSEĎÁLKOVÁ, K. - LUBASOVÁ, D. - CHALOUPEK, J. - POKORNÝ, P. - MIKEŠ, P. - CHVOJKA, J. - KOMÁREK, M. (2009): “*Physical principles of electrospinning (Electrospinning as a nano-scale technology of twenty-first century)*”, Textile Progress, No.41, pp. 59-140.
- [7] JIRSÁK, O. (2004): *Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a devic.* Patent, WO 0127365.
- [8] KOVÁŘ, R. (2012): “*Ways to Pull Down Spinning Nanofibers from the Rotating Brush in High Voltage Area*”. In: 53rd International Conference of Machine Design Departments, Brno, pp. 141-144.